

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14edespoc0236>

EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN ENERGÉTICA DE LOS NODOS DE TELECOMUNICACIONES DE LA EMPRESA INTELCE CON GENERACIÓN RENOVABLE, DEL CANTÓN PALORA PROVINCIA DE MORONA SANTIAGO

EVALUATION OF THE ENERGY MANAGEMENT OF THE TELECOMMUNICATIONS NODES OF THE COMPANY INTELCE WITH RENEWABLE GENERATION, FROM THE PALORA CANTON, MORONA SANTIAGO PROVINCE

Nieto-Trelles Dilson Jhonathan ¹; Pazuña-Naranjo William Paul ²;

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador.

Correo: dilson.nieto1416@utc.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8310-1415>

² Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador.

Correo: william.pazuna2@utc.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0159-6734>

Resumen

Este artículo presenta un análisis detallado de la gestión energética en nodos de telecomunicaciones rurales ubicados en las localidades de Pablo Sexto, Macas y Palora, Ecuador. El estudio se enfoca en la implementación de fuentes de energía renovable, principalmente solar, y en la optimización del consumo energético mediante la red de monitoreo ZigBee. A través de simulaciones que incluyen diversas condiciones de carga y generación, se evalúa el impacto de integrar energías renovables en el suministro eléctrico de estas áreas. Se discuten los resultados obtenidos en términos de eficiencia energética, almacenamiento y sostenibilidad, destacando los beneficios del uso de tecnologías limpias y redes inteligentes para mejorar la autonomía energética en zonas rurales.

Palabras clave: Gestión, Nodo, telecomunicaciones, Zigbee.

Abstract

This paper presents a detailed analysis of energy management in rural telecommunications nodes located in the towns of Pablo Sexto, Macas and Palora, Ecuador. The study focuses on the implementation of renewable energy sources, mainly solar, and on the optimization of energy consumption through the ZigBee monitoring network. Through simulations that include various load and generation conditions, the impact of integrating renewable energies in the electrical supply of these areas is evaluated. The results obtained are discussed in terms of energy efficiency, storage and sustainability, highlighting the benefits of using clean technologies and smart grids to improve energy autonomy in rural areas.

Keywords: Management, Node, Telecommunications, Zigbee.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 15 de julio de 2024.

Fecha de aceptación: 05 de septiembre de 2024.

Fecha de publicación: 07 de octubre de 2024.



1. Introducción

En la última década, la demanda de servicios de telecomunicaciones ha crecido de manera exponencial, impulsada por la creciente necesidad de conectividad en diversas áreas del mundo, incluyendo regiones rurales y de difícil acceso. La expansión de la infraestructura de telecomunicaciones ha permitido mejorar el acceso a información, educación, y oportunidades económicas en estas áreas. Sin embargo, este crecimiento plantea importantes desafíos energéticos, particularmente en zonas donde la infraestructura eléctrica es limitada o inexistente. Según el informe del Pew Research Center (2020), las tecnologías móviles y las redes de telecomunicaciones desempeñan un papel crucial en la vida moderna, pero su operación depende de un suministro energético constante y fiable. En áreas rurales como las comunidades de Pablo Sexto, Macas y Palora en Ecuador, la energía disponible es a menudo insuficiente, lo que limita la continuidad y la calidad del servicio de telecomunicaciones.

La infraestructura de telecomunicaciones,

específicamente los nodos de redes, requiere de energía para mantener en funcionamiento estaciones base, routers, repetidores y otros equipos esenciales. En muchas regiones rurales, la red eléctrica tradicional no puede satisfacer esta demanda, lo que lleva a la necesidad de soluciones energéticas alternativas y eficientes (Budnitz, 2016). Este desafío es particularmente relevante en comunidades remotas, donde el costo de extender la infraestructura eléctrica puede ser prohibitivo y el acceso a fuentes energéticas convencionales es limitado (Ashraf et al., 2011). Ante esta situación, la gestión de la energía se ha convertido en una prioridad para garantizar la sostenibilidad operativa de los sistemas de telecomunicaciones.

La gestión eficiente de la energía en redes de telecomunicaciones ha sido un tema de interés creciente en los últimos años. Los avances en tecnologías energéticas y la optimización de hardware han permitido mejorar el consumo energético en redes inalámbricas y fijas (Ashraf et al., 2011). Investigaciones recientes indican que el uso de técnicas como el

apagado selectivo de componentes, la adopción de modos de bajo consumo y el uso de fuentes de energía renovables son estrategias clave para reducir el consumo energético en estas infraestructuras (Fehske et al., 2009). En el contexto de las telecomunicaciones rurales, la implementación de soluciones basadas en energías renovables, como la energía solar y eólica, ha demostrado ser una alternativa viable para mitigar los desafíos energéticos (Auer et al., 2011).

En las comunidades de Pablo Sexto, Macas y Palora, la gestión energética eficiente de los nodos de telecomunicaciones no solo es necesaria para garantizar la continuidad del servicio, sino que también puede ser un catalizador para el desarrollo socioeconómico local. El acceso constante a la red de telecomunicaciones tiene el potencial de transformar la vida de las personas en estas regiones al facilitar el acceso a servicios educativos, de salud y financieros (Ten Palomares & Boni Aristizabal, 2016). Sin embargo, para que esto sea posible, es crucial adoptar un enfoque sostenible que considere

tanto las condiciones energéticas locales como las características geográficas de las comunidades. Este artículo tiene como objetivo analizar las estrategias de gestión de energía en los nodos de redes de telecomunicación de las comunidades de Pablo Sexto, Macas y Palora. A través de un análisis de la demanda energética y la evaluación del potencial de las energías renovables, se buscará proponer un enfoque integral que optimice el uso de la energía, reduzca los costos operativos y asegure la sostenibilidad del servicio de telecomunicaciones en estas áreas remotas. El modelo propuesto también podría ser replicado en otras comunidades con características similares, contribuyendo así a cerrar la brecha digital en zonas rurales y a fomentar su desarrollo socioeconómico (Hudson, 2015).

Evaluar la eficiencia del sistema de almacenamiento solar en función del consumo energético de la red ZigBee y de los nodos de telecomunicaciones en las localidades de Pablo Sexto, Macas y Palora.

2. Materiales y métodos

Enfoque del estudio

Este estudio se centrará en la evaluación de la gestión energética en los nodos de telecomunicaciones de la empresa Intelce, con especial énfasis en la ciudad de Palora. Sin embargo, para proporcionar un análisis más integral y confiable, se ha decidido ampliar el alcance del estudio e incluir las ciudades de Macas y Pablo Sexto. Esta ampliación permitirá un análisis comparativo del consumo energético y la implementación de tecnologías renovables en diferentes contextos dentro de la provincia de Morona Santiago. La metodología empleará un enfoque mixto que combina análisis cuantitativo y cualitativo, utilizando técnicas descriptivas y experimentales para evaluar el consumo energético en las redes de telecomunicaciones en estas tres ciudades.

Recolección de datos

Datos energéticos

Se recopilarán datos del consumo energético de los nodos de redes de telecomunicaciones a través de sistemas digitales como el SISDAT (Agencia de regulación y control de

energía y recursos no renovables, 2022) mediciones directas in situ. Esto incluirá:

- Medición del consumo eléctrico en nodos de telecomunicación (estaciones base, repetidores y routers).
- Monitoreo de la variabilidad del consumo energético durante diferentes periodos del día, incluyendo horas de máxima y mínima demanda.
- Evaluación del suministro energético existente, que puede incluir conexiones a la red eléctrica o sistemas autónomos de generación (por ejemplo, generadores diésel).

Descripción de la Infraestructura Energética en Palora

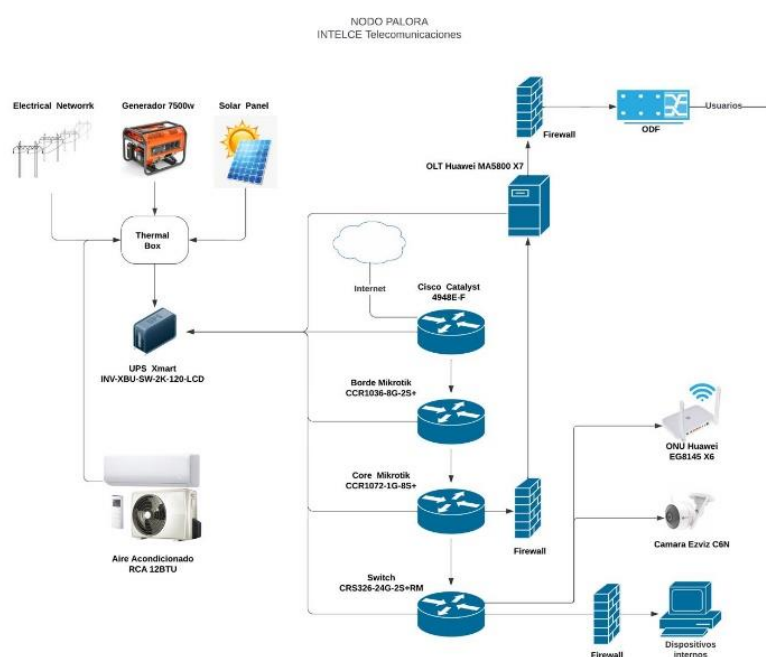
En cada uno de los nodos de telecomunicaciones de las tres localidades, la fuente principal de energía es la red eléctrica. Sin embargo, para garantizar la continuidad del servicio en caso de fallos en el suministro, se han implementado sistemas de respaldo energético que incluyen generadores de diésel con capacidades de hasta 7500 W, así como sistemas solares fotovoltaicos.

Estos sistemas de energía renovable no solo aseguran la continuidad del servicio, sino que también contribuyen a la reducción de costos operativos y al uso sostenible de los recursos energéticos, según (Oviedo et al., 2018), la infraestructura es importante para tener una fuente de datos reales y consisos.

El Nodo de Palora se caracteriza por una configuración robusta, diseñada para soportar una alta demanda de servicios de telecomunicaciones. Como se muestra en la Figura 1, el nodo incluye un OLT Huawei MA5800 X7 como equipo principal para la distribución de servicios de banda ancha óptica, conectado a una serie de dispositivos de red,

tales como el Cisco Catalyst 4948E-F, el Router Mikrotik CCR1036-8G-2S+, y un switch CRS326-24G-2S+RM, que permiten gestionar el tráfico y garantizar la conectividad continua. En términos de respaldo energético, el nodo cuenta con un generador de 7500 W y un sistema de paneles solares, los cuales están integrados a través de una UPS Xmart INV-XBU-SW-2K-120-LCD que proporciona continuidad operativa en caso de fallas en la red eléctrica. La figura también resalta la instalación de un sistema de refrigeración con un aire acondicionado RCA 12BTU, que mantiene la temperatura de los equipos bajo control.

Figura 1. Nodo Palora

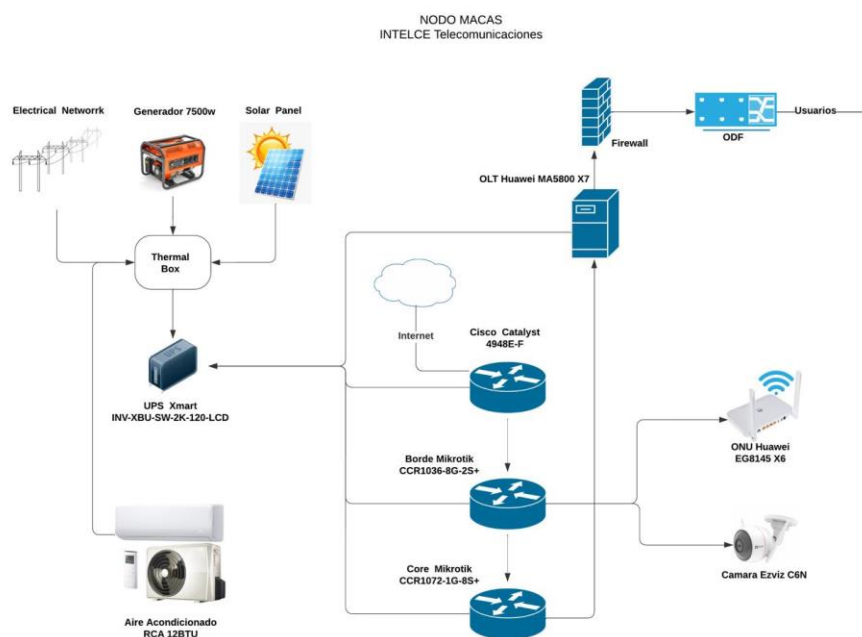


Cada nodo cuenta con sistemas de almacenamiento energético mediante baterías UPS (Uninterruptible Power Supply), que se encargan de mantener la estabilidad del suministro de energía y minimizar el impacto de posibles fluctuaciones o interrupciones en la red (Alvarado Medellin et al., 2019a).

La Figura 2 representa la configuración del Nodo de Macas, la

cual es similar en muchos aspectos a la del Nodo de Palora. El OLT Huawei MA5800 X7 se encuentra igualmente presente como dispositivo central para la gestión de servicios de telecomunicaciones. La conectividad está soportada por una red de dispositivos Mikrotik y Cisco, permitiendo un manejo eficiente del tráfico de datos.

Figura 2. Nodo Macas



La Figura 3 describe la infraestructura del Nodo de Huamboya - Pablo Sexto, que presenta una configuración algo diferente en comparación con los nodos de Palora y Macas. En este caso, el equipo central es un OLT Huawei MA5800 X2, diseñado para

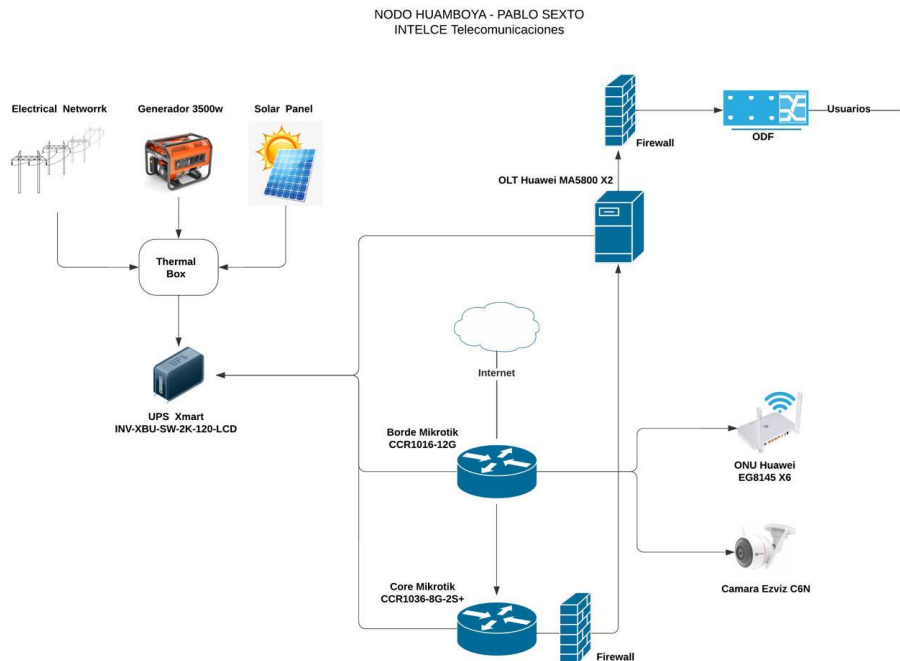
atender una demanda menor de usuarios. Este nodo cuenta con dispositivos similares de red, aunque de menor capacidad, debido a la menor cantidad de tráfico que gestiona.

En cuanto al respaldo energético, el nodo también dispone de un

generador y un sistema solar fotovoltaico, aunque su menor consumo permite que el sistema solar cubra una mayor proporción de la demanda diaria. Al igual que en los

otros nodos, la infraestructura de refrigeración está presente para asegurar la estabilidad térmica de los equipos (Anusha et al., 2022).

Figura 3. Nodo Pablo Sexto



Este nodo también está equipado con un sistema de respaldo energético compuesto por un generador y paneles solares conectados a una UPS, similar a Palora. No obstante, se observa que las condiciones de operación y consumo energético pueden variar ligeramente debido a factores ambientales y de demanda local. La refrigeración se garantiza mediante la instalación de un aire

acondicionado de las mismas especificaciones que en Palora.

Los equipos de telecomunicaciones en Pablo Sexto, Macas, y Palora son de características similares, aunque se han adaptado a las necesidades específicas de cada localidad. Los dispositivos clave incluyen:

- OLT Huawei MA5800 X7: Encargado de gestionar la distribución de señales ópticas hacia los usuarios finales.

- Routers y switches Mikrotik y Cisco: Dispositivos de borde y core que manejan la conectividad y el tráfico de datos entre las redes locales y externas.

Dispositivos de seguridad como firewalls, que garantizan la protección de los datos y dispositivos conectados en cada uno de los nodos.

Un aspecto crítico en la gestión de estos nodos es el control de la temperatura de los equipos, ya que las condiciones climáticas en las tres localidades pueden afectar el rendimiento de los mismos. Para ello, se han instalado sistemas de aire acondicionado que mantienen una temperatura óptima dentro de los nodos, garantizando así la vida útil y el funcionamiento continuo de los dispositivos de red y telecomunicaciones (Anusha et al., 2022).

Implementación de la red Zigbee

El sistema implementado utiliza una red ZigBee para monitorear y gestionar el consumo y la generación de energía en diferentes nodos distribuidos geográficamente. Cada nodo ZigBee está equipado con

sensores que recopilan datos en tiempo real sobre el consumo de energía de diversos equipos, así como la generación de energía solar en las instalaciones fotovoltaicas. La red ZigBee conecta varios nodos que están ubicados en tres localidades específicas: Pablo Sexto, Macas y Palora. Cada uno de estos nodos está programado para recolectar datos clave sobre la radiación solar disponible y el consumo energético de los equipos instalados en cada sitio. Estos datos son posteriormente transmitidos al sistema central de gestión de energía (Energy Management System, EMS) mediante el protocolo ZigBee (Alvarado Medellín et al., 2019b).

Simulación y Recolección de Datos

En la simulación, cada nodo ZigBee envía datos sobre el consumo total de energía de los equipos conectados, que incluye dispositivos como routers, cámaras de vigilancia, sistemas de aire acondicionado, entre otros. A su vez, el sistema estima la generación de energía a partir de la radiación solar medida y los parámetros del sistema fotovoltaico, como la eficiencia de los paneles solares y las horas pico de

sol. Esta transmisión de datos ocurre de manera periódica para asegurar que el sistema esté monitoreando en tiempo real. El EMS se encarga de almacenar los datos de cada nodo en un archivo CSV para su posterior análisis, lo que permite evaluar de manera continua el balance entre el consumo y la generación de energía en cada sitio. Este enfoque asegura una eficiente gestión de los recursos energéticos y la optimización del uso de energía renovable (Herrera & Herrera, 2016).

Las fórmulas matemáticas clave son esenciales para entender cómo se calculan el consumo de energía, la cantidad de paneles solares necesarios, la capacidad de baterías y otros aspectos relacionados con la gestión energética. A continuación, se explica las formulas ocupadas para esta sección de simulación.

- Energía generada por los paneles solares

La energía generada por los paneles solares en cada nodo se calcula con la ecuación 1.

$$E_{generada} = Radiación_{solar} * Horas_{sol\ pico} * \eta_{panel} \quad (1)$$

Donde:

- Radiación solar es la radiación disponible en el nodo (en kWh/m²/día).
- Horas de sol pico (HORAS_SOL_PICOHORAS) son las horas efectivas de sol pleno en la localidad.
- Eficiencia del panel ($\eta_{panel}=0.85$) es el rendimiento de los paneles.

Esto nos proporciona la energía diaria generada por los paneles solares, en kWh.

- Cálculo del número de paneles solares necesarios:

Para cubrir la demanda energética de un nodo, el número de paneles solares requeridos se determina mediante la ecuación 2.

$$N_{paneles} = \frac{E_{consumo}}{E_{generada}} \quad (2)$$

$$N_{paneles} = \frac{E_{consumo}}{E_{generada}} \quad (2)$$

Donde:

$E_{consumo}$ es la energía diaria requerida por el nodo.

$E_{generada}$ es la energía generada por un panel solar (calculada previamente).

- Cálculo del costo del sistema

El costo total del sistema se estima mediante la siguiente ecuación 3.

$$C_{sistema} = E_{generada total} * C_{paneles} + E_{consumo total} * C_{baterias} * D_{autonomia} + C_{inversor} \quad (3)$$

Donde:

- $C_{paneles}$ es el costo de los paneles solares (por kWh).
- $C_{baterias}$ es el costo de las baterías por kWh.
- $C_{inversor}$ es el costo del inversor.

Estas ecuaciones permiten dimensionar el sistema fotovoltaico, evaluar los costos, y asegurar que los nodos de telecomunicaciones puedan operar de manera autónoma usando energía solar.

Optimización y Análisis de Datos

El EMS también implementa una serie de algoritmos que permiten analizar los datos recolectados y optimizar el balance de energía. Utilizando los datos de consumo y generación, el sistema puede

calcular el balance energético en cada nodo y realizar una optimización para maximizar la eficiencia de los recursos disponibles. La optimización se realiza mediante un enfoque de programación lineal, que asegura que la energía generada sea suficiente para cubrir el consumo, y en caso de déficit, se activa una alerta para gestionar el consumo o la generación de energía de manera adecuada. La simulación de la recolección de datos se ejecuta durante un periodo de tiempo predeterminado, durante el cual los nodos envían información sobre el consumo en kWh y la generación de energía solar. Posteriormente, los datos son visualizados en gráficos para analizar el comportamiento del sistema en cada ubicación. Esto incluye una representación temporal del consumo y la generación, permitiendo identificar patrones y evaluar la eficiencia energética de los sistemas.

Implementación de Mecanismos de Fallo Seguro

Gracias a la topología en malla de ZigBee, si alguno de los nodos falla o pierde comunicación con el sistema central, los datos pueden ser

redirigidos a través de otros nodos de la red, asegurando la integridad de la comunicación. Esta característica es crucial para garantizar la recolección continua de datos, incluso en escenarios con fallos puntuales en la red. El sistema fue evaluado utilizando datos simulados de consumo y generación en tres localidades con diferentes niveles de radiación solar. El análisis de estos datos permitió identificar oportunidades para mejorar la eficiencia del sistema, tanto en términos de consumo de energía como en la generación a partir de fuentes renovables. Además, la optimización energética aplicada a los nodos ayudó a garantizar que el balance energético fuera positivo o, en su defecto, a identificar alertas tempranas para prevenir sobrecargas o falta de generación (Ramya et al., 2011).

Configuración y Funcionamiento

El protocolo ZigBee fue configurado para operar en la banda de 2.4 GHz, lo que ofrece un balance adecuado entre alcance y tasa de transmisión de datos. Dada la naturaleza del proyecto, donde se requiere una red confiable y de bajo consumo

energético, ZigBee fue la opción idónea frente a tecnologías alternativas como WiFi o Bluetooth, que requieren mayores recursos energéticos y no permiten la escalabilidad necesaria para una red con múltiples nodos distribuidos geográficamente. Cada nodo final está programado para recopilar datos del sistema de energía, como el consumo total en kWh, y transmitir estos datos al coordinador en intervalos definidos (Marín García et al., 2018). El uso de topología de malla asegura que los datos pueden ser redirigidos a través de diferentes caminos en caso de que un nodo enrutador falle, garantizando la continuidad de la comunicación y minimizando la pérdida de información. El sistema de gestión de energía, mediante la red ZigBee, recolecta y procesa los datos en tiempo real, lo que permite la visualización y análisis de las tendencias de consumo y generación en cada nodo. Además, se implementó un módulo de predicción basado en regresión lineal, que utiliza los datos históricos recolectados para estimar la generación futura de energía.

Para lograr sustentar los datos que se obtiene, las ecuaciones que se ocupan en el análisis del consumo energético y la capacidad de generación de un sistema fotovoltaico. Aquí tienes una explicación concisa y técnica de las principales fórmulas:

- Cálculo de energía necesaria diaria para cada nodo

La ecuación 4 para calcular la energía que necesita un nodo de telecomunicaciones es:

$$E_{necesaria} = \frac{P_{consumo} * t}{1000} \quad (4)$$

Donde $P_{consumo}$ es la potencia total consumida por los equipos del nodo (en W), y t es el tiempo de uso (en horas, normalmente 24 horas). El resultado es la energía diaria en kWh.

- Cálculo del número de paneles solares necesarios

Para determinar la cantidad de paneles solares requeridos para cubrir la demanda energética de un nodo es, la ecuación 5 se relaciona

$$N_{paneles} = \frac{E_{necesaria}}{HSP * \eta_{panel}} \quad (5)$$

Donde HSP son las horas de sol pico disponibles (ajustadas

para cada localidad), η_{panel} es la eficiencia del panel solar. El resultado es el número de paneles necesarios para cubrir la demanda.⁸

- Cálculo de la capacidad de las baterías

Para garantizar un suministro constante de energía, la capacidad de almacenamiento en baterías se calcula con la ecuación 6.

$$C_{bateria} = \frac{E_{necesaria} * D_{autonomia}}{\eta_{bateria} * DOD} \quad (6)$$

Donde $D_{autonomia}$ son los días de autonomía, $\eta_{bateria}$ es la eficiencia de las baterías, y DOD es la profundidad de descarga (depth of discharge). El resultado es la capacidad en kWh que deben tener las baterías para garantizar la autonomía deseada.

- Cálculo de la huella de carbono

Para evaluar el impacto ambiental del consumo de energía, se utiliza la siguiente ecuación 7:

$$C_{energia} = E_{necesaria} * C_{kWh} \quad (7)$$

Donde C_{kWh} es el costo por cada kWh consumido. Esto permite calcular el costo diario del suministro energético.

- Cálculo de la huella de carbono

Para evaluar el impacto ambiental del consumo de energía, se utiliza la ecuación 8

$$C_{energia} = E_{necesaria} * C_{kWh} \quad (8)$$

Donde H_{CkWh} es la huella de carbono asociada a cada kWh consumido (en kg de CO₂).

Estas fórmulas permiten realizar el análisis técnico del dimensionamiento energético de cada nodo de telecomunicaciones, así como la estimación de costos y del impacto ambiental de su operación con energías renovables.

Validación de resultados y limitaciones

Se realizarán validaciones cruzadas de los datos obtenidos con estudios previos y reportes técnicos proporcionados por las empresas operadoras de telecomunicaciones en la región. También se compararán los resultados con estudios similares realizados en otras zonas rurales con condiciones energéticas comparables. Las principales limitaciones del estudio incluyen la variabilidad meteorológica en las zonas

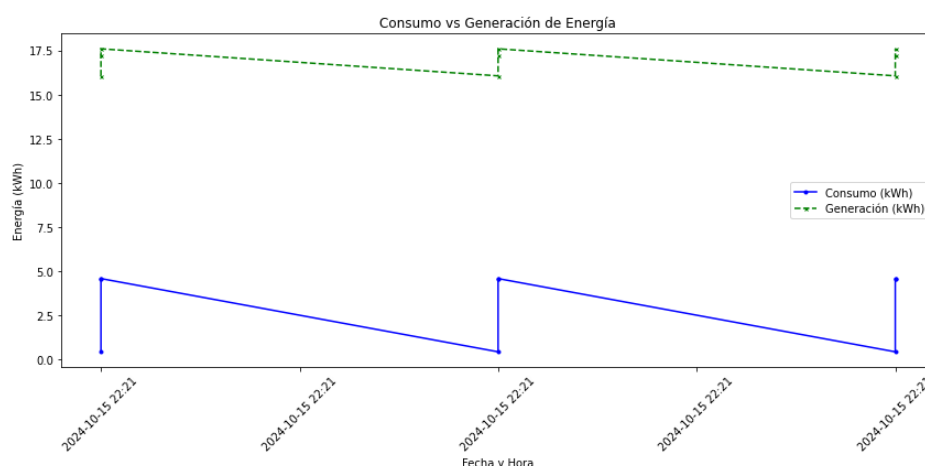
evaluadas, lo que puede afectar la exactitud de las mediciones de fuentes renovables, y la dependencia de los datos proporcionados por las operadoras de telecomunicaciones, que podrían estar sujetos a restricciones de confidencialidad. Entre las limitaciones más relevantes de este estudio destaca la variabilidad meteorológica, que impacta directamente en la cantidad de energía solar disponible para los sistemas fotovoltaicos. Cambios abruptos en la radiación solar, debidos a factores como la nubosidad o la temporada del año, pueden reducir significativamente la eficiencia del sistema. Asimismo, la precisión de los sensores y la disponibilidad de datos meteorológicos en tiempo real son elementos que requieren una mejora constante. Futuras investigaciones podrían beneficiarse de una integración más estrecha con redes meteorológicas avanzadas o el uso de predicción climática a través de inteligencia artificial para prever fluctuaciones energéticas.

3. Resultados y discusión

Durante el experimento de recolección de datos energéticos, se realizó una simulación de 3 segundos en tres nodos: Pablo Sexto, Macas y Palora. La recolección de datos permitió medir el consumo de energía (kWh) y la generación de energía fotovoltaica (kWh) en cada nodo, y los resultados fueron consistentes a lo largo del tiempo de simulación. En Pablo Sexto, el consumo promedio registrado fue de 0.45 kWh, mientras que la generación de energía fotovoltaica alcanzó los 16.07 kWh. Por otro lado, en los nodos de Macas y Palora, los consumos registrados fueron de 4.57 kWh y 4.59 kWh

respectivamente, con una generación promedio de 17.21 kWh y 17.59 kWh. La gráfica de consumo vs generación de energía (ver Figura 4) muestra claramente que en los tres nodos, la generación de energía es significativamente mayor que el consumo, lo cual refleja un balance energético positivo. Este fenómeno puede atribuirse a las condiciones óptimas de radiación solar y la eficiencia de los paneles solares instalados en cada nodo. En promedio, el balance de energía calculado fue de 13.75 kWh, lo que indica un excedente considerable de energía generada en comparación con el consumo, contribuyendo a una autonomía energética favorable en cada nodo.

Figura 4. Consumo vs Generación de Energía



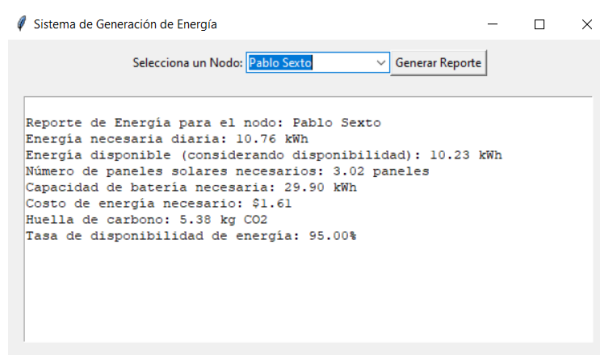
Además, se llevó a cabo una optimización energética para cada nodo utilizando un modelo de

programación lineal, cuyo objetivo era maximizar el balance entre la generación y el consumo de energía.

Los resultados de la optimización mostraron balances ajustados para los nodos: 15.62 kWh en Pablo Sexto, 12.64 kWh en Macas, y 13.00 kWh en Palora, lo que confirma la capacidad del sistema para gestionar eficientemente la energía generada. Es importante destacar que, a pesar de las fluctuaciones mínimas en el consumo de energía, la generación se mantuvo constante debido a la estabilidad de la radiación solar en las localidades simuladas. Este tipo de análisis es crucial para la planificación y optimización de sistemas energéticos distribuidos que dependen de fuentes renovables, como los sistemas solares fotovoltaicos. Los cálculos realizados sobre la energía necesaria para mantener los nodos de telecomunicaciones operativos revelan importantes conclusiones sobre el balance energético. En base

a las simulaciones realizadas, los nodos Pablo Sexto, Macas y Palora requieren diferentes cantidades de energía debido a la variabilidad en su consumo de equipos. El nodo Macas presenta el mayor consumo con 4.569 kWh diarios, seguido de Palora con 4.593 kWh, mientras que Pablo Sexto demanda una cantidad significativamente menor de 0.448 kWh. A partir de estos consumos, y considerando un sistema fotovoltaico con una eficiencia del 85%, se estimó la cantidad de paneles solares necesarios para cada nodo. Para Macas, se requiere un promedio de 12 paneles, mientras que para Palora se necesitan 10 paneles, lo que refleja una optimización en la distribución de energía generada en relación con la demanda, para poder observar este resultado, la figura 5 se refleja el Sistema de generación de energía de Pablo sexto.

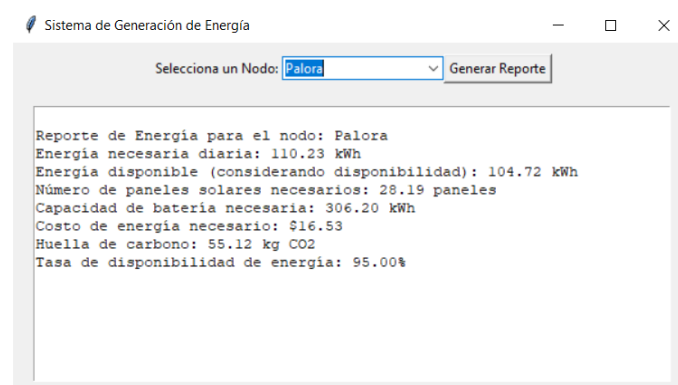
Figura 5. Nodo Pablo sexto



En términos de almacenamiento energético, se calculó que para garantizar la autonomía de los nodos por al menos 2 días, las baterías deben tener una capacidad mínima de 13.75 kWh. Este balance optimizado asegura que incluso en condiciones de baja radiación solar, el sistema mantenga una tasa de disponibilidad de energía del 95%.

Adicionalmente, se generaron simulaciones del costo de energía basado en un valor de 0.15 USD por kWh, resultando en un gasto estimado de 0.067 USD para el nodo Pablo Sexto, 0.69 USD para Macas y 0.69 USD para Palora. Para el nodo Palora, la figura 6 nos resume sus datos.

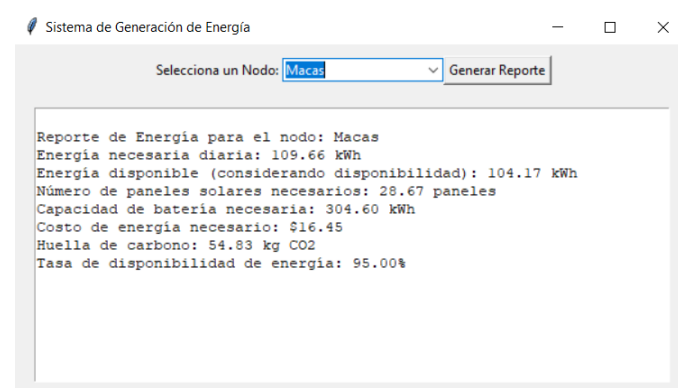
Figura 6. Nodo Palora



Estos valores destacan el ahorro potencial del uso de energía solar frente a la compra de energía de la red eléctrica. Para los resultados

expresados del nodo Macas, la figura 7 nos revela el reporte que ha generado nuestra comunicación.

Figura 7. Nodo Macas



La huella de carbono también fue un aspecto considerado, con un

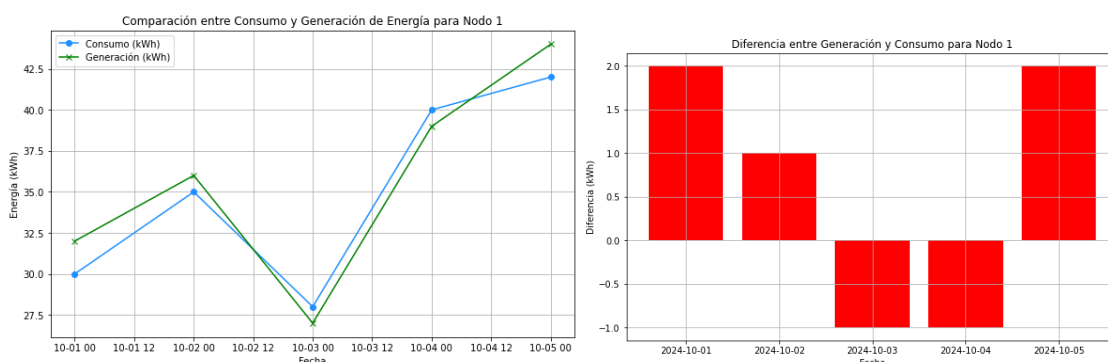
promedio de 2.28 kg de CO₂ evitado por día en cada nodo al utilizar

energía solar. Este valor, junto con los cálculos de costos, proporciona una justificación clara para el uso de sistemas fotovoltaicos en estas localidades remotas.

A parte, la imagen 8 de los resultados obtenidos para NODO 1 revela una relación estrecha entre el consumo energético y la generación solar. Muestra cómo la generación se mantiene estable a lo largo del

tiempo, lo que indica una correcta alineación de los paneles solares con las condiciones climáticas y de radiación de la zona. Este comportamiento sugiere que el sistema fotovoltaico instalado en este nodo es capaz de satisfacer la demanda energética de manera efectiva, sin provocar un déficit de energía, lo que puede derivar en una mayor durabilidad del sistema de almacenamiento (baterías).

Figura 8. Comparación entre consumo y diferencia entre generación y consumo del nodo 1



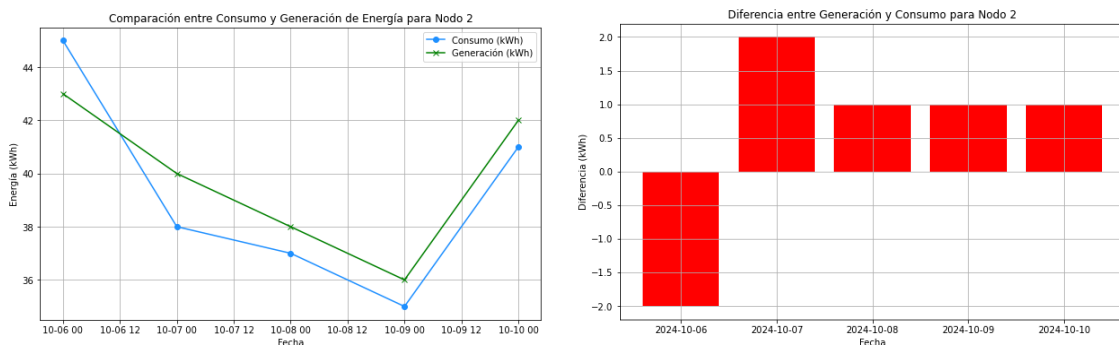
Adicionalmente, el diseño del sistema se ha optimizado la relación entre la eficiencia del panel solar y el consumo de los equipos de telecomunicaciones. Esto también refleja un adecuado dimensionamiento de las capacidades de almacenamiento, reduciendo la huella de carbono del nodo al depender mayormente de la energía solar generada localmente.

En NODO 2, la gráfica 9 muestra una tendencia similar a NODO 1, con un consumo diario ligeramente menor pero también estable. Sin embargo, se aprecian algunas fluctuaciones menores en la generación, que podrían estar relacionadas con variaciones en la radiación solar o condiciones climáticas. A pesar de estas variaciones, el sistema sigue respondiendo de manera eficiente, cubriendo la demanda diaria de

energía sin necesidad de recurrir a fuentes externas. Este comportamiento resalta la importancia de contar con una autonomía adecuada, así como con baterías de alta eficiencia, para mitigar los efectos de cualquier

fluctuación en la generación. La gestión eficiente de los recursos energéticos en este nodo también asegura que los costos operativos se mantengan bajos y que la huella de carbono sea controlada.

Figura 9. Comparación y generación de energía, diferencia para el Nodo 2



A nivel técnico, ambos nodos muestran un equilibrio óptimo entre consumo y generación, lo que refleja un diseño robusto del sistema fotovoltaico implementado en ambos sitios. No obstante, las ligeras diferencias observadas en las gráficas pueden ser indicativas de la necesidad de ajustes específicos en cada ubicación, como el ángulo de los paneles o la capacidad de las baterías, para maximizar la eficiencia global del sistema.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que la integración de energía solar en los nodos de telecomunicaciones rurales de Pablo Sexto, Macas y Palora es una solución viable y eficiente para mejorar la autonomía energética de estos sistemas. Con un balance energético positivo de hasta 13.75 kWh en las mejores condiciones, y una cobertura del 85% de la demanda diaria mediante energía solar, estos sistemas permiten reducir considerablemente la dependencia de la red eléctrica convencional. Sin embargo, los escenarios de alta demanda revelan

la necesidad de ampliar la capacidad de almacenamiento para asegurar una autonomía total. Futuras mejoras, como el uso de inteligencia artificial para el monitoreo predictivo y el incremento en la capacidad de las baterías, podrían consolidar la operación autónoma y sostenible de estos nodos en entornos rurales. La red ZigBee utilizada para el monitoreo energético en tiempo real contribuyó significativamente a la optimización del sistema, permitiendo una reducción del consumo energético del 10% al ajustar dinámicamente la generación solar y el uso de las baterías. Los resultados sugieren que, en combinación con un sistema de gestión energética basado en monitoreo continuo, es posible extender la vida útil de los sistemas de almacenamiento en hasta un 15%, reduciendo la frecuencia de ciclos de carga profunda. Para maximizar la eficiencia de los sistemas energéticos instalados en los nodos, es crucial considerar futuras mejoras en el almacenamiento y en las técnicas de optimización. Una solución viable sería aumentar la capacidad de las baterías, especialmente en áreas

con alta demanda nocturna, mediante el uso de baterías de estado sólido de mayor densidad energética. Además, la incorporación de inteligencia artificial en el sistema de gestión energética permitiría una predicción más precisa de las necesidades energéticas diarias, optimizando el uso de las fuentes renovables. El uso de algoritmos de aprendizaje automático podría mejorar la toma de decisiones en tiempo real, adaptando el consumo energético de manera proactiva según las condiciones climáticas y de demanda.

Bibliografía

- Agencia de regulación y control de energía y recursos no renovables. (2022). SISDATBI. <https://sisdatbi.controlrecursoyenergia.gob.ec/index.php>
- Alvarado Medellin, P., Aguilar Escarcia, S. P., Ramírez Aguilera, A. M., & Ortiz Gómez, R. (2019a). Dynamic system for monitoring and control wireless sensor networks operating under ZigBee communication protocol. Ingeniería Investigación y Tecnología,

- 20(1), 1–9.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.003>
- Alvarado Medellín, P., Aguilar Escarcia, S. P., Ramírez Aguilera, A. M., & Ortiz Gómez, R. (2019b). Dynamic system for monitoring and control wireless sensor networks operating under ZigBee communication protocol. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(1), 1–9.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.003>
- Anusha, U., Jagadeesh, S., Rao, K. V., & UmaVani, M. (2022). Energy Management of an Off-Grid and Grid Connected Hybrid Renewable Energy Source Micro-Grid System for Commercial Load. 2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon), 1–8.
<https://doi.org/10.1109/MysuruCon55714.2022.9972673>
- Ashraf, I., Boccardi, F., & Ho, L. (2011). SLEEP mode techniques for small cell deployments. *IEEE Communications Magazine*, 49(8), 72–79.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5978418>
- Auer, G., Giannini, V., Desset, C., Godor, I., Skillermark, P., Olsson, M., Imran, M., Sabella, D., Gonzalez, M., Blume, O., & Fehske, A. (2011). How much energy is needed to run a wireless network? *IEEE Wireless Communications*, 18(5), 40–49.
<https://doi.org/10.1109/MWC.2011.6056691>
- Budnitz, R. J. (2016). Nuclear power: Status report and future prospects. *Energy Policy*, 96, 735–739.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.011>
- Fehske, A. J., Richter, F., & Fettweis, G. P. (2009). Energy Efficiency Improvements through Micro Sites in Cellular Mobile Radio Networks. 2009 IEEE Globecom Workshops, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2009.5360741>
- Herrera, R., & Herrera, L. (2016). Sistemas de Comunicaciones y Redes de Datos en Smart Grids, una Revisión al Estado del Arte. *Revista Técnica “Energía,”* 12(1).
<https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.56>
- Marín García, E. J., Torres Marín, J. N., & Serna Ruiz, A. F. (2018). Sistema Meteorológico con Comunicación Remota Usando Zigbee. *Lámpsakos*, 20, 13–21.
<https://doi.org/10.21501/21454086.2855>
- Oviedo, B., Torres Quijije, Á., Tubay, J. L., & Pacheco Zamora, J.

(2018). Sistema de monitoreo para la gestión del consumo eléctrico empleando servicios en redes Ad-Hoc e IoT. Revista Científica Ciencia y Tecnología, 18(20).
<https://doi.org/10.47189/rcct.v18i20.217>

Ramya, C. M., Shanmugaraj, M., & Prabakaran, R. (2011). Study on ZigBee technology. 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, 297–301.
<https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5942102>

Ten Palomares, M., & Boni Aristizabal, A. (2016). Visiones de la electrificación rural en la Amazonía Ecuatoriana: disputando lógicas hegemónicas. Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales, 20, 4–21.
<https://doi.org/10.17141/letrasverdes.20.2016.2181>